



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 199 17 519 A 1**

⑤① Int. Cl.⁷:
G 02 B 7/188
G 02 B 7/183
G 02 B 5/08
G 02 B 26/00

②① Aktenzeichen: 199 17 519.5
②② Anmeldetag: 17. 4. 1999
②③ Offenlegungstag: 16. 11. 2000

DE 199 17 519 A 1

⑦① Anmelder:
Dornier GmbH, 88039 Friedrichshafen, DE

⑦② Erfinder:
Döngi, Frank, Dr., 88682 Salem, DE; Sippel, Rudolf,
88677 Markdorf, DE; Stute, Thomas, 88697
Bermatingen, DE

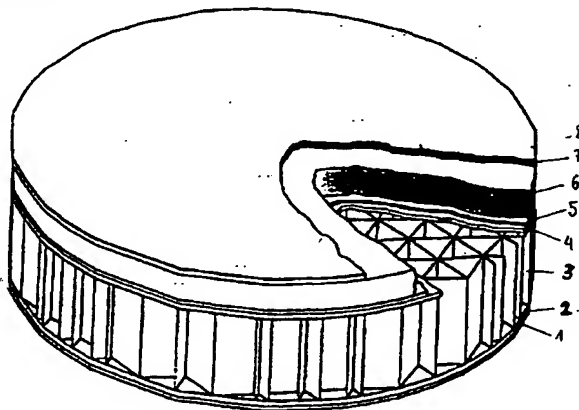
⑤⑥ Entgegenhaltungen:
US 42 80 756
EP 06 49 036 B1
Merkle, Fritz: Adaptive Optik, In: Physik in
unserer Zeit, 22. Jg., Nr. 6, S. 260-266, 1991;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Großer optischer Spiegel in kombinierter Sandwichbauweise

⑤⑦ Die Erfindung betrifft einen großen, aktiv formkorrigierbaren optischen Spiegel mit hoher passiver Grundgenauigkeit. Die dem passiven Spiegel inhärenten Restfehler können durch strukturkonform angebrachte Aktoren unterdrückt werden. Hierbei ist keine sekundäre Stützstruktur für die Aktoren erforderlich.



DE 199 17 519 A 1

Die Erfindung betrifft einen großen optischen Spiegel mit hoher passiver Grundgenauigkeit.

Mittlere und große optische Spiegel werden zum Beispiel benötigt für astronomische Teleskope, zur Übertragung von Laserstrahlen, oder zur Konzentration von Sonnenlicht. Grundsätzliche Anforderungen für diese Anwendungen sind extreme Formbeständigkeit unter allen auftretenden Umweltbedingungen und geringes Gewicht. Ein derartiger optischer Spiegel ist aus EP 0 649 036 B1 bekannt.

Passive optische Spiegel können nur mit einer endlichen Genauigkeit hergestellt werden. Umwelteinflüsse wie Windlasten oder Temperaturveränderung sind auch bei sehr steifen Konstruktionen Ursache für Verformungen im kritischen Bereich. Daher werden mittlere und große optische Spiegel vor allem bei astronomischen Teleskopen aktiv formkorrigiert.

Stand der Technik sind:

- Vertikal zur Spiegelfrückfläche angreifende hydraulische und pneumatische Aktoren (Fig. 1) werden bei großen Spiegeln verwendet. Bei mittleren und kleinen Spiegeln werden auch elektromagnetische und Festkörperaktoren (z. B. auf Basis piezokeramischer, elektrostriktiver oder magnetostriktiver Aktoren) verwendet. Diese Aktoren verformen eine vergleichsweise dünne Membran, die die optische Oberfläche trägt. Der wesentliche Nachteil dieser Aktorkonfiguration ist der Bedarf an einer stabilen und damit schweren sekundären Stützstruktur. Außerdem mußte als störender Nebeneffekt das Durchzeichnen (Print-Through) der diskreten Aktoren in Kauf genommen werden.

- Flächige Aktoren (Fig. 2) sind strukturkonform auf die Rückseite einer dünnen optischen Membran aufgebracht. Diese Aktoren bestehen typischerweise aus einem piezokeramischen Werkstoff, der sich bei Anlegen einer elektrischen Spannung in Flächenrichtung ausdehnt oder kontrahiert. Hierdurch wird die optische Membran verformt. Aufgrund der mangelnden Eigenstabilität dünner Membranen kann diese Bauweise nur bei kleinen Spiegeln angewendet werden. Das Durchzeichnen der Aktoren ist auch hier ein störender Nebeneffekt.

Aufgabe der Erfindung ist es, bei mittleren und großen optischen Spiegeln mit hoher Grundgenauigkeit und Stabilität eine aktive Formkorrektur zu ermöglichen. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch den Gegenstand des Patentanspruchs 1 gelöst. Die Unteransprüche betreffen vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung. Die Erfindung ermöglicht den Bau mittlerer bis großer optischer Spiegel, die mittels strukturkonform angebrachter Festkörperaktoren eine aktive Formkorrektur und damit eine Unterdrückung von Restfehlern bewirken. Der optische Spiegel besitzt dabei auch im passiven Zustand eine sehr hohe Grundgenauigkeit und Stabilität. Das beim Stand der Technik vorhandene Durchzeichnen der Aktoren wird in der Erfindung signifikant reduziert. Ein sekundäre Stützstruktur ist nicht erforderlich, was zu einer wesentlich leichteren Bauweise des aktiven Spiegels führt.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der Fig. 3 bis 7 erläutert.

Fig. 3 zeigt einen erfindungsgemäßen großen, aktiv formkorrigierbaren optischen Spiegel, wobei die Struktur in einem Teilbereich aufgeschnitten dargestellt ist.

Fig. 4 zeigt den Aufbau des Spiegels von Fig. 3 in einem vergrößerten Ausschnitt.

Fig. 5 zeigt die Bauteile des Spiegels von Fig. 3 in einer Explosionsdarstellung und

Fig. 6 und 7 zeigen Höhenlinienbilder erfindungsgemäßer Spiegel.

Beim passiven Grundkörper des Spiegels besteht die rückwärtige Sandwichdeckschicht 2, der Wabenkern 3 sowie die vordere Deckschicht 4 vorzugsweise aus kohlefaserverstärktem Kunststoff. Dieses Material ist wegen seiner geringen Wärmedehnung, großen Steifigkeit und niedrigem Gewicht besonders geeignet. Der Aufbau der Lamine der Deckschichten 2 und 4 wurde so festgelegt, daß gleiche Lamineigenschaften in jeder Richtung vorliegen (Isotropie).

Die Zellen des Wabenkerns 3 bestehen aus gleichseitigen Dreiecken oder Sechsecken. Die Zellwände sind identisch aufgebaut und gleich dick. Das Laminat der Zellwände wurde so ausgewählt, daß die Eigenschaften in jeder Richtung gleich sind. Bei dieser Bauweise erfüllt der Wabenkern die Forderungen nach gleicher Steifigkeit und gleicher Wärmedehnung in jeder Richtung parallel zur Spiegeloberfläche (Isotropie).

Zur aktiven Formkorrektur werden beide Sandwichdeckschichten 2, 4 außen mit Aktorschichten 1 und 5 aus elektroaktiven Funktionskeramiken verklebt. Diese Materialien, darunter piezokeramische und elektrostriktive Werkstoffe, dehnen sich bei Anlegen einer elektrischen Spannung in bestimmte Vorzugsrichtungen aus. An die im Spiegel implementierten Aktorschichten 1 und 5 werden in Dickenrichtung elektrische Steuerspannungen angelegt. Hierzu sind die Aktoren auf ihren Oberseiten und Unterseiten mit dünnen metallischen Elektroden versehen. Bei Anlegen der elektrischen Spannung erfolgt eine Dehnung in Dickenrichtung, die aufgrund der geringen Dicke der Aktoren vernachlässigt werden kann. Zur Verformung des Spiegels nutzt man die gleichzeitig auftretende Dehnung in den Querrichtungen oder Membranrichtungen der Aktorschicht. Durch den Abstand der Aktorschichten von der neutralen Biegeebene des gesamten Tragwerks können durch die Aktordehnungen Biegeeffekte in den Spiegel eingebracht werden.

Um möglichst viele optische Fehler mit den Aktoren unterdrücken zu können, sind die Aktorschichten geometrisch unterteilt, d. h. sie bestehen aus mehreren individuellen Aktorplatten oder Aktorschalen. Diese können unabhängig voneinander elektrisch angesteuert werden. Die geometrische Anordnung wird punktsymmetrisch zur Spiegelmittellachse gewählt, um gleiche Eigenschaften in alle radialen Richtungen zu gewährleisten. Größere Aktoren müssen als Schalen der Krümmung der Deckschichten angepaßt sein, kleinere Aktoren können auch als flache Platten aufgeklebt werden.

Grundsätzlich ist es ausreichend, nur eine der beiden Aktorschichten 1 und 5 zu verwenden. Jedoch erhält man im Fall zweier zum Sandwich 2-3-4 symmetrisch angebrachter Aktorschichten 1 und 5 Vorteile hinsichtlich der Biegewirksamkeit sowie hinsichtlich deutlich geringerer Verformungen bei Temperaturänderung, falls das Thermaldehnungsverhalten des Aktorwerkstoffs von demjenigen des Sandwichwerkstoffs abweicht.

Die Aktorschichten 1 und 5 sind relativ dünn, typischerweise 0,2 mm bis maximal 1 mm. Sie beeinflussen die Gesamtsteifigkeit des Spiegels nur geringfügig. Elektrische Kontaktierung und Verkabelung der individuellen Aktoren sind möglichst raumsparend anzubringen. Wichtig ist eine elektrische Isolierung von Aktorelektroden und Zuleitungen vom elektrisch leitenden Werkstoff des Sandwichs. Diese Isolierung kann etwa durch Einbringen einer dünnen Schicht aus Glasfasergewebe in die Klebeschicht zwischen Aktorelektrode und benachbartem Material erfolgen.

Die rückwärtige Aktorschicht 1 ist mit der Deckschicht 2

verklebt. Die rückwärtige Deckschicht 2 ist mit dem Wabenkern 3 verklebt. Der Wabenkern 3 ist auf seiner Vorderseite mit der vorderen Deckschicht 4 verklebt. Die vordere Deckschicht 4 ist auf ihrer Vorderseite mit der vorderen Aktorschicht 5 verklebt. Die vordere Aktorschicht 5 ist auf ihrer Vorderseite mit der Druckverteilungsschicht 6 verklebt.

Als Alternative zu außen auf die Sandwichdeckschichten 2 und 4 aufgeklebten Aktorschichten 1 und 5 können die Aktoren auch in die Deckschichten eingebettet werden. Bei der Wahl piezokeramischer Fasern als Aktoren werden diese direkt in den Verbundwerkstoff der Deckschichten 2 und 4 einlaminert.

Die Druckverteilungsschicht 6 besteht vorzugsweise aus Kohleschaum. Sie dient der räumlichen Verteilung der Polierlasten während der Fertigung oder der Aktorlasten beim aktiven Betrieb des Spiegels und vermeidet so das Durchzeichnen der Wabenstruktur oder der Aktorgeometrie.

Die Druckverteilungsschicht 6 ist auf ihrer Vorderseite mit der Spiegelträgerschicht 7 verklebt. Die Spiegelträgerschicht 7 besteht vorzugsweise aus Glaskeramik mit niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten. Die vordere Oberfläche der Spiegelträgerschicht 7 ist optisch poliert und mit der Reflexionsschicht 8 beschichtet. Die Reflexionsschicht 8 besteht vorzugsweise aus einem Metall und wird beispielsweise durch Bedampfen aufgebracht.

Die Wirksamkeit der Formkorrektur wurde rechnerisch mit Hilfe eines dreidimensionalen Finite Elemente Modells nachgewiesen. Ein nach Fig. 5 aufgebauter Spiegel wurde an drei Punkten am Spiegelrand gelagert und mit Eigengewichtskräften parallel zur Spiegeloberfläche beaufschlagt (entsprechend einer horizontal liegenden optischen Achse). Die ermittelten Verformungen der Spiegeloberfläche ergeben nach Abzug der durch Starrkörperverschiebungen korrigierbaren Anteile im wesentlichen einen Restfehler in Form eines Astigmatismus, der in Fig. 6 als Höhenlinienbild dargestellt ist (Abstand der Höhenlinien = 10 nm). Durch Anlegen geeigneter elektrischer Spannungen an den 16 verschiedenen Aktorfeldern läßt sich der Restfehler ungefähr um den Faktor 5 verringern. Der nach der aktiven Formkorrektur verbleibende Restfehler ist in Fig. 7 in einem Höhenlinienbild mit gleichem Höhenlinienabstand wie in Fig. 6 dargestellt. Die benötigten elektrischen Spannungen sind kleiner als 3 Volt und liegen damit in einem gut beherrschbaren Bereich. Durch eine feinere Unterteilung der Aktorflächen kann der verbleibende Restfehler weiter verringert werden, ohne eine höhere elektrische Spannung erforderlich zu machen.

Patentansprüche

1. Großer optischer Spiegel in kombinierter Sandwichbauweise, bestehend aus den folgenden Bauteilen:
 - rückwärtige dünne Aktorschicht (1) mit mehreren individuell ansteuerbaren Aktorelementen aus piezoelektrischer Keramik mit außenliegenden Elektroden, elektrischer Kontaktierung und Verkabelung, aufgeklebt auf die rückwärtige Sandwichdeckschicht (2) und elektrisch isoliert von dieser,
 - rückwärtige Sandwichdeckschicht (2) aus kohlefaserverstärktem Kunststoff, Wabenkern (3) mit dreieckigem Zellquerschnitt aus kohlefaserverstärktem Kunststoff, aufgeklebt auf die Vorderseite der rückwärtigen Sandwichdeckschicht (2),
 - vordere Sandwichdeckschicht (4) aus kohlefaserverstärktem Kunststoff, aufgeklebt auf die Vorderseite des Wabenkerns (3),
 - vordere dünne Aktorschicht (5) mit mehreren

individuell ansteuerbaren Aktorelementen aus piezoelektrischer Keramik mit außenliegenden Elektroden, elektrischer Kontaktierung und Verkabelung, aufgeklebt auf die vordere Sandwichdeckschicht (4) und elektrisch isoliert von dieser,

- Druckverteilungsschicht (6) aus Kohleschaum, aufgeklebt auf die Vorderseite der vorderen Aktorschicht (5) und elektrisch isoliert von dieser,
- Spiegelträgerschicht (7) aus Glaskeramik, aufgeklebt auf die Vorderseite der Druckverteilungsschicht (6),
- metallische Reflexionsschicht (8) auf der Vorderseite der Spiegelträgerschicht (7).

2. Großer, aktiv formkorrigierbarer optischer Spiegel in kombinierter Sandwichbauweise nach Anspruch 1, wobei die rückwärtige oder die vordere Aktorschicht (1, 5) aus elektrostriktiven Keramiken bestehen.
3. Großer, aktiv formkorrigierbarer optischer Spiegel in kombinierter Sandwichbauweise nach Anspruch 1, wobei nur eine vordere Aktorschicht (5), aber keine rückwärtige Aktorschicht existiert.
4. Großer, aktiv formkorrigierbarer optischer Spiegel in kombinierter Sandwichbauweise nach Anspruch 1, wobei nur eine rückwärtige Aktorschicht (1), aber keine vordere Aktorschicht vorhanden ist.
5. Großer, aktiv formkorrigierbarer optischer Spiegel in kombinierter Sandwichbauweise nach Ansprüchen 1-4, wobei die Aktorschichten (1, 5) aus elektroaktiven Keramiken in die rückwärtige (2) und vordere Sandwichdeckschicht (4) eingebettet sind.
6. Großer, aktiv formkorrigierbarer optischer Spiegel in kombinierter Sandwichbauweise nach Ansprüchen 1-5, wobei Aktoren aus piezokeramischen Fasern in die rückwärtige (2) und vordere (4) Sandwichdeckschicht aus kohlefaserverstärktem Kunststoff eingebettet sind.
7. Großer, aktiv formkorrigierbarer optischer Spiegel in kombinierter Sandwichbauweise nach Ansprüchen 1-6, wobei die Wabenkernzellen (3) einen sechseckigen Querschnitt besitzen.
8. Großer, aktiv formkorrigierbarer optischer Spiegel in kombinierter Sandwichbauweise nach Ansprüchen 1-7, wobei die rückwärtige Deckschicht (2), der Wabenkern (3) oder die vordere Deckschicht (4) aus kohlefaserverstärkter Keramik oder aus kohlefaserverstärktem Kohlenstoff besteht.
9. Großer, aktiv formkorrigierbarer optischer Spiegel in kombinierter Sandwichbauweise nach Ansprüchen 1-8, wobei die Druckverteilungsschicht (6) aus Glaschaum oder aus keramischem Schaum mit niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten besteht.
10. Großer, aktiv formkorrigierbarer optischer Spiegel in kombinierter Sandwichbauweise nach Ansprüchen 1-9, wobei die Spiegelträgerschicht (7) aus Quarzglas oder aus einem anderen Glas mit niedrigem Wärmeausdehnungskoeffizienten besteht.
11. Großer, aktiv formkorrigierbarer optischer Spiegel in kombinierter Sandwichbauweise nach Ansprüchen 1-10, wobei die Spiegelträgerschicht (7) aus Siliziumkarbid besteht.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

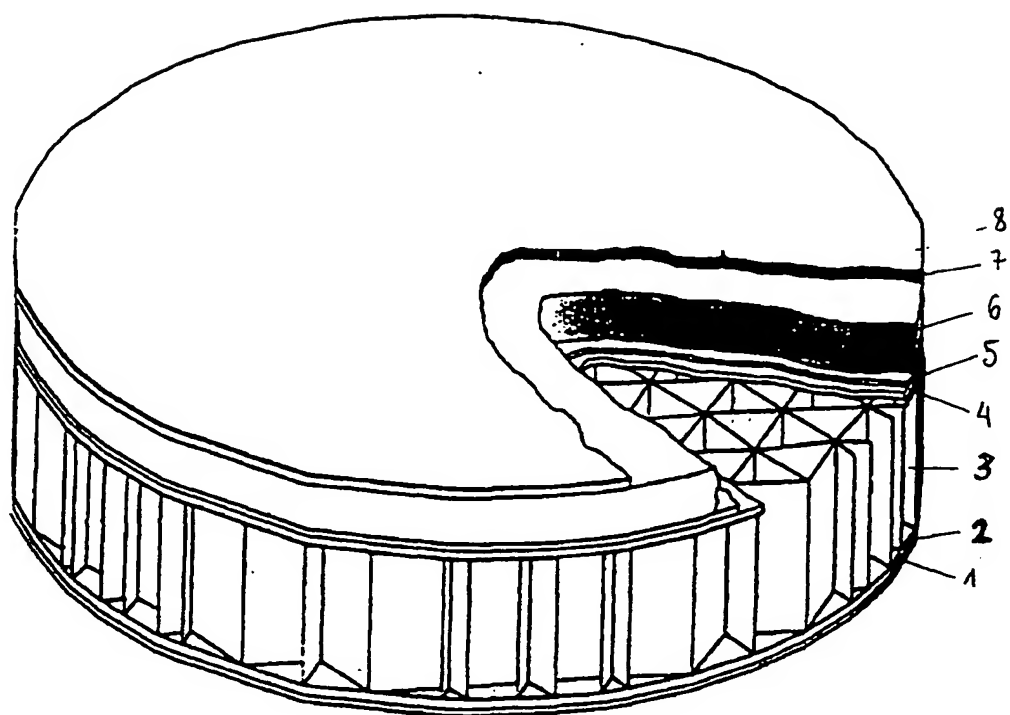


Fig. 3

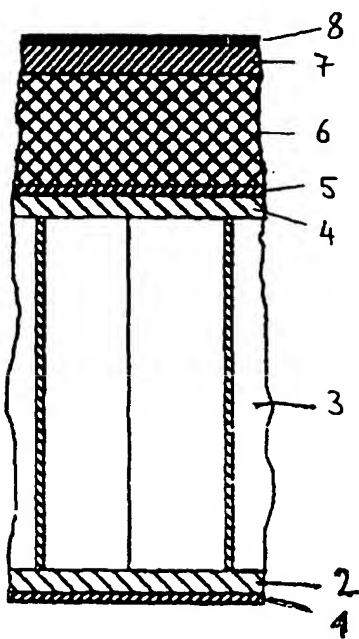


Fig. 4

Stand der Technik

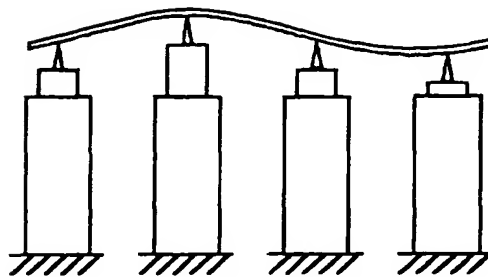


Fig. 1: Dünne Spiegelmembran mit diskreten, vertikal angreifenden Aktoren

Stand der Technik

Untersicht



Schnittdarstellung

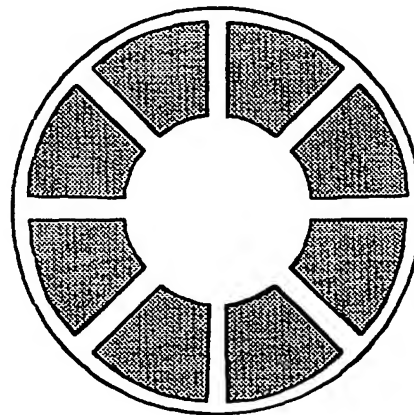


Fig. 2: Dünne Spiegelmembran mit strukturkonform aufgetragenen Aktoren

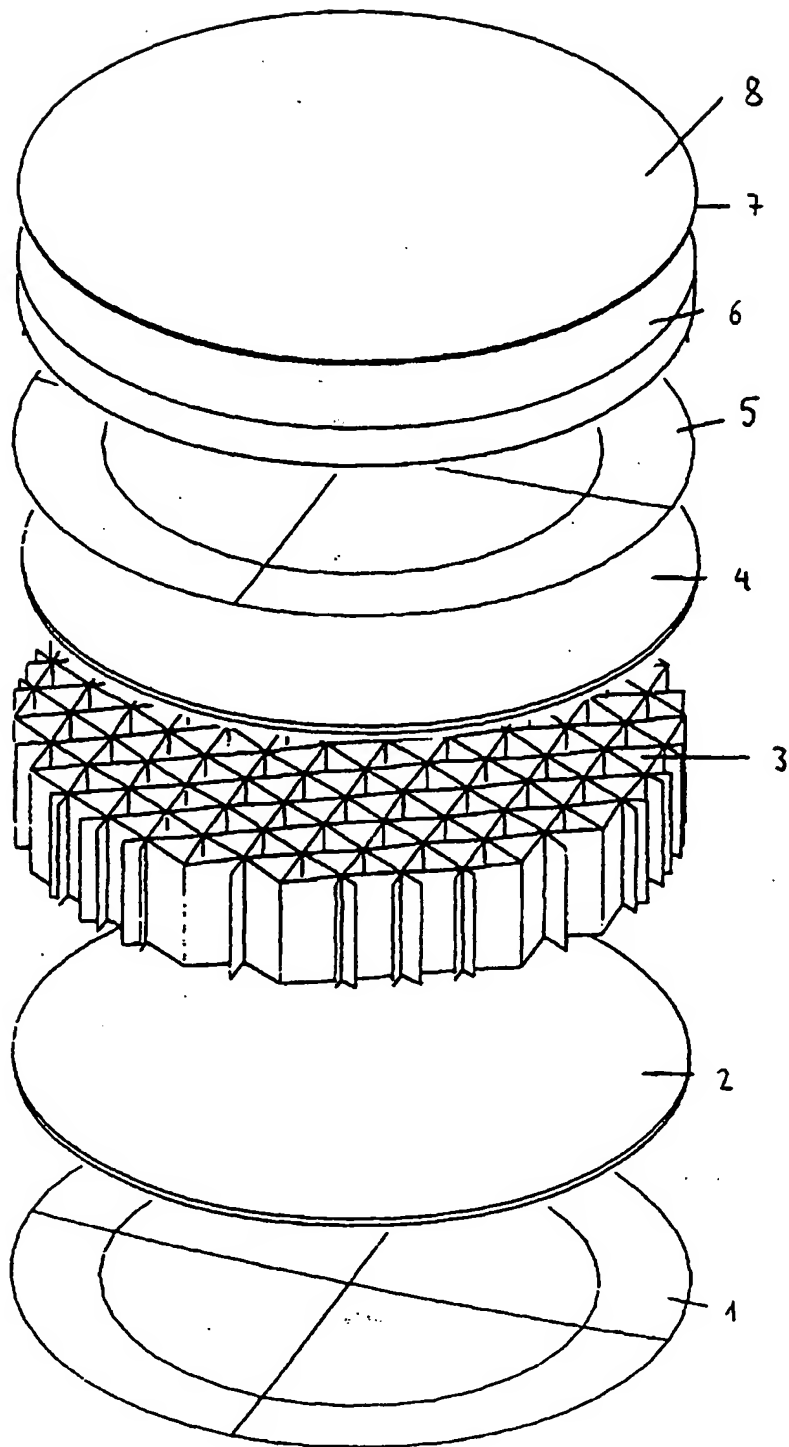


Fig. 5

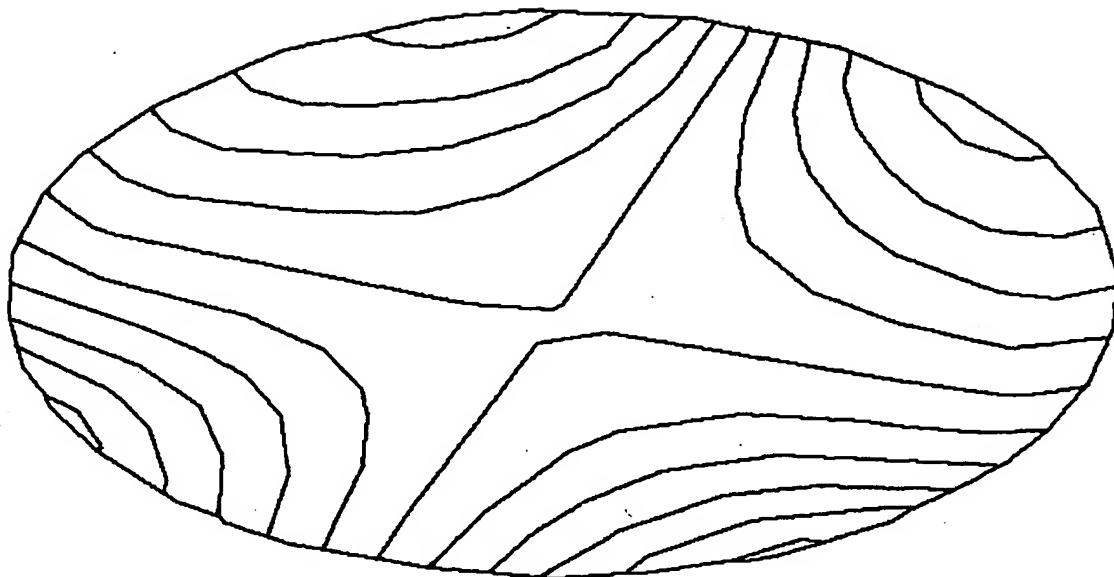


Fig. 6

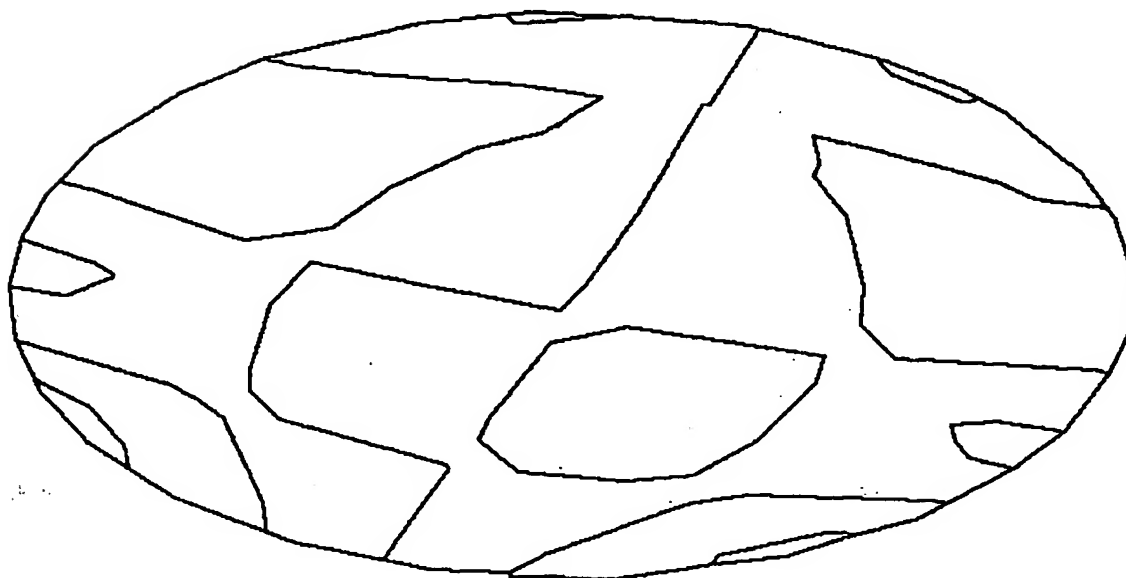


Fig. 7